

На правах рукописи



Шарипов Артем Маратович

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ
ДИАГНОСТИКЕ ПАРАМЕТРОВ ТРЕЩИН ГИДРОРАЗРЫВА
НЕФТЯНОГО ПЛАСТА**

Специальность 01.04.14 Теплофизика и теоретическая теплотехника

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук**

Уфа 2017

Работа выполнена на кафедре геофизики ФГБОУ ВО «Башкирский государственный университет».

Научный руководитель: **Шарафутдинов Рамиль Фаизырович**
доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Прибатурин Николай Алексеевич**
доктор технических наук, главный научный
сотрудник лаборатории проблем
тепломассопереноса ФГБУН Институт теплофизики
им. С. С. Кутателадзе СО РАН

Мусакаев Наиль Габсалямович
доктор физико-математических наук, доцент,
главный научный сотрудник, зам. директора ТюмФ
ИТПМ СО РАН по научной работе

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт механики им. Р.Р.
Мавлютова Уфимского научного центра
Российской академии наук

Защита состоится «27» сентября 2017 г. в 13:00 часов на заседании диссертационного совета Д.212.274.10 при ФГАОУ ВО «Тюменский государственный университет» по адресу: 625003, г. Тюмень, ул. Перекопская 15а, ауд. 410.

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-библиотечном центре ФГАОУ ВО «Тюменский государственный университет» и на сайте университета: <https://diss.utmn.ru/sovet/diss-sovet-212-274-10/zashchita/314952/>

Автореферат разослан « 22 » июля 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д.212.274.10,
д-р физ.-мат. наук.

Удовиченко С.Ю.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время в связи с необходимостью интенсификации добычи нефти активно применяется технология гидравлического разрыва пласта (ГРП). При этом важной задачей является контроль качества проведения операции с целью совершенствования технологии, корректировки дизайна ГРП и определения параметров полученной трещины.

Разработаны различные технологии для контроля качества проведения гидроразрыва пласта. У каждого из этих методов различная информативность: наиболее информативными являются наклонотрия и микросейсмические исследования. Но эти методы являются дорогостоящими и технологически сложными. В связи с этим актуальными являются работы, направленные на повышение информативности более простых и дешевых методов. Одним из таких методов является термометрия.

Метод термометрии активно применяется в скважинной геофизике. С его помощью выделяют интервалы притока в скважине, оценивают техническое состояние эксплуатационной колонны и НКТ, выделяют интервалы ЗКЦ, определяют места поступления газа. В отличие от гидродинамических исследований, термометрия позволяет получить индивидуальные характеристики каждого пласта (интервала притока) в случае многопластовой системы.

Результаты полевых и теоретических исследований показали, что температура чувствительна к наличию трещины ГРП: с помощью температурных замеров в скважине уверенно определяется высота трещины. Важной задачей является определение геометрии трещины – длины, ширины, азимутального направления. Сложность решения данной задачи обусловлена тем, что в настоящее время недостаточно изучены термогидродинамические процессы в системе пласт-трещина ГРП. Поэтому актуальными являются теоретические исследования, направленные на изучение влияния трещины ГРП на формирование полей температуры и давления. В представленной работе задача решается с помощью математического моделирования, получены аналитические решения и разработана численная модель.

Цель диссертационной работы состоит в исследовании теплофизических процессов при фильтрации жидкости в пласте с трещиной ГРП для определения параметров трещины по термометрии.

Основные задачи, решаемые в диссертации:

1. Анализ существующих подходов для моделирования процессов тепломассопереноса в системе пласт – трещина ГРП.
2. Моделирование процессов тепломассопереноса при неизотермической фильтрации жидкости в системе пласт – трещина ГРП с учетом термодинамических эффектов.

3. Исследование параметрической чувствительности изменения температуры в скважине к изменению длины, ширины и проницаемости трещины при различных режимах работы скважины: отбор, закачка и остановка.
4. Изучение возможности практического использования полученных результатов для определения параметров трещины ГРП.

Объектом исследования является нефтяной пласт с трещиной ГРП при различных режимах работы скважины: отбор, закачка и остановка.

Предметом исследования являются температурные поля при неизотермической фильтрации жидкости в пласте при различных свойствах пласта и трещины.

Методы исследования. Математическое моделирование процессов тепломассопереноса при неизотермической фильтрации флюида в пласте с трещиной ГРП, проведение численных экспериментов и анализ полученных результатов.

Научная новизна:

1. Разработана аналитическая и численная модели для расчета тепломассопереноса в системе пласт – трещина ГРП с учетом термодинамических эффектов. Проведен анализ параметрической чувствительности температуры к изменению параметров трещины.
2. Установлены диагностические признаки линейного и радиального режимов течения жидкости в пласте на основе изменения температуры в скважине с трещиной ГРП.
3. Установлено, что при отборе жидкости из пласта изменение температуры в трещине опережает темпы роста температуры в пласте из-за проявления эффекта Джоуля-Томсона, на основании этого можно определять азимутальное направление трещины ГРП с помощью замеров распределенными датчиками температуры в скважине.
4. Изучено влияние нарушенной зоны на изменение температуры в скважине. Установлено, что наличие трещины затрудняет диагностику нарушенной зоны по данным термометрии, а низкая проницаемость пласта приводит к увеличению влияния кондуктивного механизма теплопереноса из-за низкой скорости фильтрации жидкости, что также осложняет диагностику.
5. Установлено, что наличие трещины в пласте приводит к увеличению темпов восстановления температуры в скважине после остановки закачки. Анализ восстановления температуры в скважине в интервале пласта с трещиной ГРП позволяет оценить ширину трещины.

Теоретическая и практическая значимость работы. Полученные результаты позволяют расширить теоретические представления о формировании температурных полей в скважинах с ГРП и достоверно проводить интерпретацию.

Разработанные модели и методы решения позволяют прогнозировать параметры трещины ГРП.

Основные положения и результаты, выносимые на защиту:

1. Результаты анализа чувствительности температуры к изменению длины трещины, проницаемости пласта и дебита, полученные на основе аналитических моделей для линейного и радиального режимов течения жидкости при условии постоянного дебита.
2. Обоснование диагностических признаков линейного и радиального режимов течения жидкости в пласте на основе изменения температуры в скважине.
3. Разработанная численная модель для расчета полей давления, температуры в системе пласт-трещина ГРП. Методика решения с использованием двух независимых расчетных сеток.
4. Результаты анализа параметрической чувствительности температуры к изменению длины и ширины трещины, проницаемости трещины и пласта при различных режимах работы скважины на основе численной модели.
5. Методики определения параметров трещины ГРП на основе регистрации изменения температуры в скважине.

Обоснованность и достоверность результатов следует из корректности физической и математической постановки задачи; применения фундаментальных уравнений тепло- и массопереноса; применения современных численных методов; решения тестовых задач, которые имеют известные аналитические решения; сравнения с коммерческим численным симулятором COMSOL Multiphysics.

Личный вклад автора. Автором разработаны математические модели неизотермической фильтрации жидкости в системе пласт – трещина ГРП с учетом термодинамических эффектов; проведено тестирование моделей и численные эксперименты.

Апробация работы. Результаты работы докладывались на следующих научных конференциях:

- Международная школа-конференция «ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ МАТЕМАТИКА И ЕЕ ПРИЛОЖЕНИЯ В ЕСТЕСТВОЗНАНИИ». г. Уфа. 2014.
- Девятая молодежная научно-практическая конференция “Разведочная и промысловая геофизика: теория и практика”. г. Уфа. 2014 г.
- Международная юбилейная XX научно-практическая конференция «Новая техника и технологии для геофизических исследований скважин». г. Уфа. 2014.
- Международный VIII Российско-китайский симпозиум по промысловой геофизике. Пекин, КНР, ноябрь 2014 г.

- Международная школа-конференция «ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ МАТЕМАТИКА И ЕЕ ПРИЛОЖЕНИЯ В ЕСТЕСТВОЗНАНИИ» посвященная 70-летию Победы в ВОВ. г. Уфа. 2015.
- Международный форум “Black Gold”. г. Уфа 11-13 мая.
- Международная XXI научно-практическая конференция «Новая техника и технологии для геофизических исследований скважин». г. Уфа. 2015 г.
- XX научно - практическая конференция «Новая импортозамещающая Hi-Tech техника и технологии ГИС». г. Уфа. 2015 г.
- Всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых ученых ВНКСФ-21, Омск, 2015.
- SPE Black Gold Symposium, 2016. Ufa.
- Молодежная научно-практическая конференция в рамках XXIV международной выставки «Газ. Нефть. Технологии-2016». г. Уфа. 26.05.2016.
- Молодежная конференция «Геолого-геофизические исследования нефтегазовых пластов». г. Уфа. 25.05.2017.

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы в 14 печатных работах, в т.ч. 6 в рецензируемых научных журналах из перечня ВАК и получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Общий объем работы составляет 138 страниц, включает 92 рисунка и 5 таблиц. Список литературы содержит 103 наименования.

Благодарности. Автор выражает благодарность за финансовую поддержку Российскому Фонду Фундаментальных Исследований, работа выполнена при поддержке гранта РФФИ: конкурс «офи_м», тема 615, номер проекта 16-29-15130. (исполнитель).

Автор выражает благодарность компании Total (Тоталь Разведка Разработка Россия) за финансовую поддержку и ее сотрудникам за ценные советы и обсуждения при выполнении данной работы.

Автор выражает глубокую благодарность научному руководителю Р.Ф. Шарафутдинову за интересную постановку задачи и помощь при выполнении диссертации. Автор выражает благодарность А.Ш. Рамазанову за помощь при разработке аналитических моделей. Автор выражает благодарность А.А. Садретдинову за помощь при разработке численной модели и симулятора. Автор признателен всем сотрудникам кафедры геофизики БашГУ за ценные советы, обсуждения и помощь в подготовке данной работы.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы исследования, сформулированы цели и задачи. Приведена практическая и теоретическая значимость результатов работы, показана научная новизна. Изложены результаты, выносимые на защиту.

В первой главе приведен обзор математических моделей для моделирования термогидродинамических процессов в системе пласт-трещина ГРП и методов численного решения. Первые попытки расчета температурных полей в пласте с трещиной ГРП были предприняты еще в 70-е годы учеными Wheeler J.A., Whitsitt N. F., Dysart G. R., Sinclair A.R., Biot M.A., Masse L., Medlin W.L. Также значительный вклад в развитие этого направления внесли зарубежные и отечественные ученые: Hoang H., Mahadevan J., Lopez H., Бочков А. С., Кокурина В. В., Ribeiro P. M., Horne R. N., App J. F., Гильмиев Д. Р., Cui J., Zhu D., Jin M., Мусалеев Х., Мельников С., Питюк Ю. А., Давлетбаев А. Я., Гадильшина В. Р., Nozomu Yoshida, A. D. Hill и др.

Анализ опубликованных работ показал, что в настоящее время проделан достаточно большой объем исследований по изучению полей температуры в пласте с трещиной ГРП. Но есть необходимость в дальнейшем улучшении представленных моделей и исследовании влияния параметров трещины на формирование термогидродинамических полей. Нет исследований с наличием нарушенной зоны в пласте, не изучены особенности восстановления температуры в скважине после остановки закачки. Для того, чтобы производить быстрые оценочные расчеты и тестировать численные модели необходимо получить аналитические решения для расчета изменения температуры в скважине в процессе отбора при наличии в пласте трещины ГРП.

Во второй главе представлены аналитические модели для расчета полей давления и температуры в пласте в случае линейного режима течения (при наличии трещины ГРП) и в случае радиального режима течения (без трещины). При выводе уравнений были сделаны следующие допущения:

- постоянный дебит;
- режим упругого пласта, однофазный режим течения;
- пласт однородный и бесконечный;
- однотемпературная модель;
- теплопроводность жидкости и породы не учитывается;
- проницаемость трещины ГРП намного больше проницаемости пласта (трещина не оказывает гидродинамического сопротивления);
- плотности, вязкости жидкостей считаются постоянными;

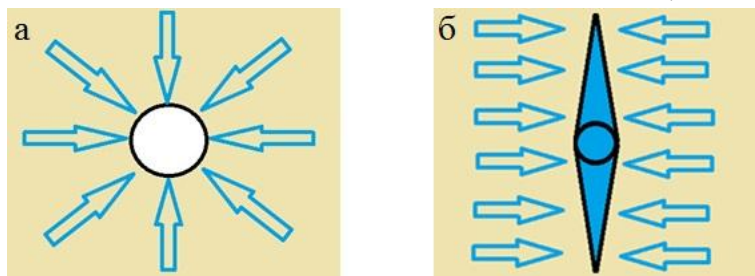


Рис. 1. Режимы притока: а - радиальный приток; б – линейный приток.

Рассмотрим радиальный режим течения в пласте (рис. 1а). Распределение давления в пласте в этом случае описывается следующей формулой:

$$p(r, t) = p_{nl} + \frac{Q}{4\pi\sigma} E_i\left(-\frac{r^2}{4\chi \cdot t}\right) \quad (1)$$

где P_{nl} - начальное давление в пласте, Q - дебит, σ - гидропроводность пласта, E_i - интегральная показательная функция, χ - пьезопроводность пласта, t – время.

Изменение температуры жидкости на выходе из пласта в случае радиального режима течения с учетом эффекта Джоуля - Томсона и эффекта адиабатического расширения описывается следующей приближенной формулой¹:

$$T_{скв}(t) \approx T_0 + \varepsilon \left[p(r_T, t) - p(r_{скв}, t) \right] \frac{\eta \cdot m \cdot C_{ж}}{C_{пл}} \left[p_{пл} - p(r_T, t) \right] \quad (2)$$

где T_0 - начальная температура пласта, ε - коэффициент Джоуля – Томсона жидкости, r_T - радиус термозондирования, η - коэффициент адиабатического расширения жидкости, m – пористость, $C_{ж}$ и $C_{пл}$ - объемная теплоемкость жидкости и пласта соответственно, P_{nl} - пластовое давление, $r_{скв}$ - радиус скважины.

Теперь рассмотрим линейный режим течения в пласте (рис. 1б), он соответствует участкам с трещиной ГРП. В этом случае распределение давления в пласте описывается следующей формулой:

$$p(x, t) = p_{nl} - 2 \frac{\mu \cdot Q}{k \cdot S_{mp}} \sqrt{\chi \cdot t} \cdot Ierfc\left(\frac{x}{2\sqrt{\chi \cdot t}}\right) \quad (3)$$

$$S_{mp} = 4 \cdot L \cdot h$$

где S_{mp} - площадь поверхности трещины, k - проницаемость пласта, μ - вязкость жидкости, L – полудлина трещины, h – высота трещины.

$$Ierfc(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_z^\infty \int_u^\infty e^{-w^2} dw \Big|_u \quad (4)$$

Изменение температуры жидкости на выходе из пласта в случае линейного режима течения с учетом эффекта Джоуля - Томсона и эффекта адиабатического расширения можно рассчитать аналогично формуле (2):

$$T_{скв}(t) \approx T_0 + \varepsilon \left[p(x_T, t) - p(0, t) \right] \frac{\eta \cdot m \cdot C_{ж}}{C_{пл}} \left[p_{пл} - p(x_T, t) \right] \quad (5)$$

где x_T - радиус термозондирования.

На рисунке 2 представлено сравнение результатов расчета изменения температуры жидкости на выходе из пласта в случае линейного и радиального режимов течения после пуска скважины с постоянным дебитом. При этом удельный дебит (на единицу высоты) из трещины варьировался от 30 до 70 $m^2 / сут$, полудлина трещины 20 м, проницаемость пласта 30 мД, $\varepsilon = 0.04$ С/атм, $\eta = 0.014$ С/атм, $\mu = 10$ сПз, $m = 0.1$, пласт насыщен нефтью.

¹ Чекалюк Э.Б. Термодинамика нефтяного пласта.- М.: Недра, 1965.- 238с.

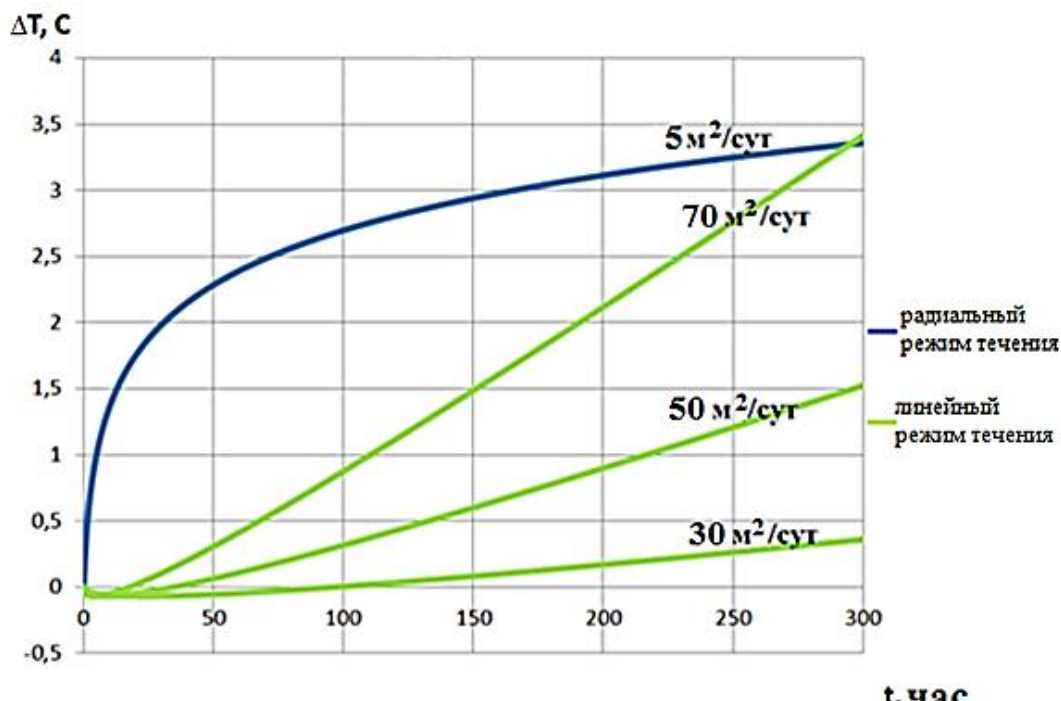


Рис. 2. Сопоставление результатов расчета изменения температуры жидкости на выходе из пласта: синяя кривая соответствует радиальному режиму течения, зеленые кривые – линейному; шифр кривых - удельный дебит (на единицу высоты).

Из графика видно, что температура напротив пласта с трещиной ГРП увеличивается медленнее. Это связано, во-первых, с особенностью распределения давления в пласте (при радиальном режиме течения около скважины наблюдаются большие градиенты давления и, соответственно, сильнее проявляется разогрев за счет эффекта Джоуля-Томсона) и, во-вторых, с влиянием адиабатического расширения (в случае линейного режима течения наблюдается длительное охлаждение ниже начальной температуры). С течением времени, жидкость будет приходить из все более дальних зон пласта, поэтому вклад дроссельного разогрева будет расти. Это приводит к тому, что температура жидкости, поступающей из пласта с трещиной ГРП, постепенно приблизится к температуре жидкости, поступающей из пласта с радиальным режимом течения. Причем, чем больше дебит, тем быстрее будет рост температуры. Но даже если дебит из пласта с трещиной превосходит на порядок дебит из однородного пласта (на рис. 2 показано сравнение $5 \text{ м}^3/\text{сут}$ и $70 \text{ м}^3/\text{сут}$), то температура сравняется через достаточно большое количество времени (около 300 часов).

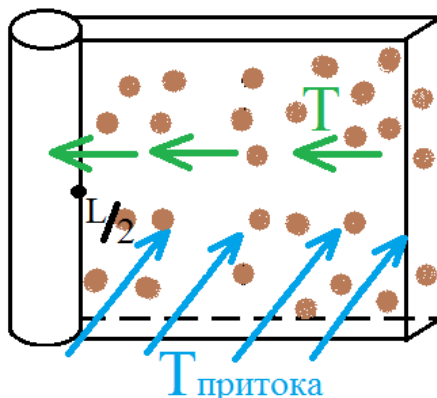


Рис. 3. Геометрия трещины

В п. 2.3 рассмотрен вывод уравнения расчета температуры в трещине (рис. 3), при этом были использованы следующие допущения:

- трещина рассматривается как прямоугольный параллелепипед;
- однотемпературная модель;
- приток равномерный по всей трещине;
- в трещине и пласте одна и та же жидкость;
- эффект Джоуля-Томсона и эффект адиабатического расширения не учитывается в трещине;

В результате было получено аналитическое решение изменения температуры в трещине:

$$T(t) = T_0 e^{-\frac{t}{\tau}} + \int_0^t T_{\text{притока}}(\alpha) \frac{e^{-\frac{t-\alpha}{\tau}}}{\tau} d\alpha \quad (6)$$

где τ - постоянная времени температурного влияния трещины, T_0 - начальная температура трещины, $T_{\text{притока}}$ - температура притекающей из пласта жидкости.

На рис. 4 показан график изменения температуры в трещине и притекающей из пласта жидкости для следующих параметров: удельный дебит нефти $50 \text{ м}^3/\text{сут}$, пористость трещины 0.3, полудлина трещины 20 м, ширина трещины 5 мм. После пуска скважины наблюдается понижение температуры, связанное с эффектом адиабатического расширения. Как видно из графика, температура в трещине изменяется медленнее, чем температура притекающей из пласта жидкости. Разница между температурой притекающей из пласта жидкости и температурой трещины связана с эффектом температурного влияния трещины и обусловлена теплоемкостью трещины. Это можно рассматривать как дополнительный к ТВСС температурный эффект на измеряемую в стволе скважины нестационарную температуру.

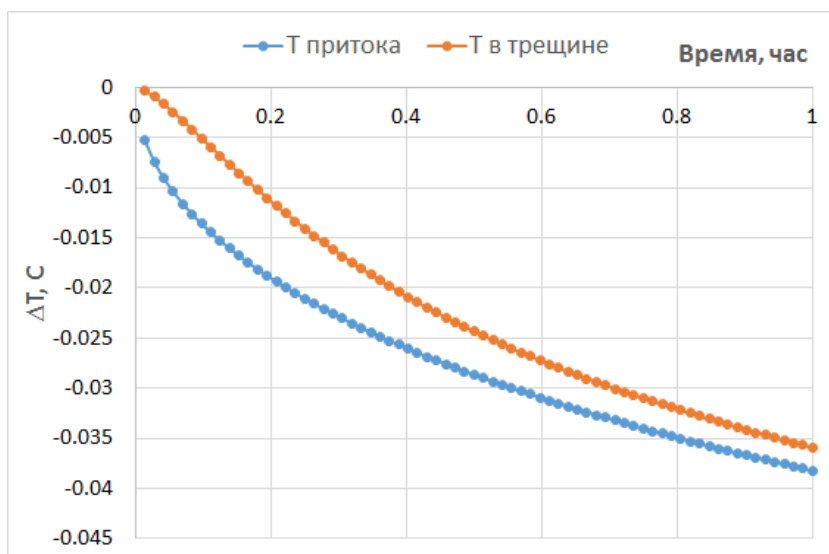


Рис. 4. Сравнение изменения температуры жидкости на выходе из пласта и в трещине после пуска скважины

Было произведено исследование влияния полудлины трещины, проницаемости пласта, дебита на изменение температуры жидкости на выходе из пласта при линейном режиме течения. Показано, что увеличение проницаемости пласта (рис. 5), полудлины трещины (рис. 6) приводит к увеличению времени влияния эффекта адиабатического расширения. На основании полученных зависимостей были составлены палетки времени наступления минимума температуры от площади поверхности трещины (произведение длины трещины на высоту) при различной проницаемости пласта и дебите (рис. 7). Данные палетки могут быть использованы для определения площади поверхности трещины по данным изменения температуры.

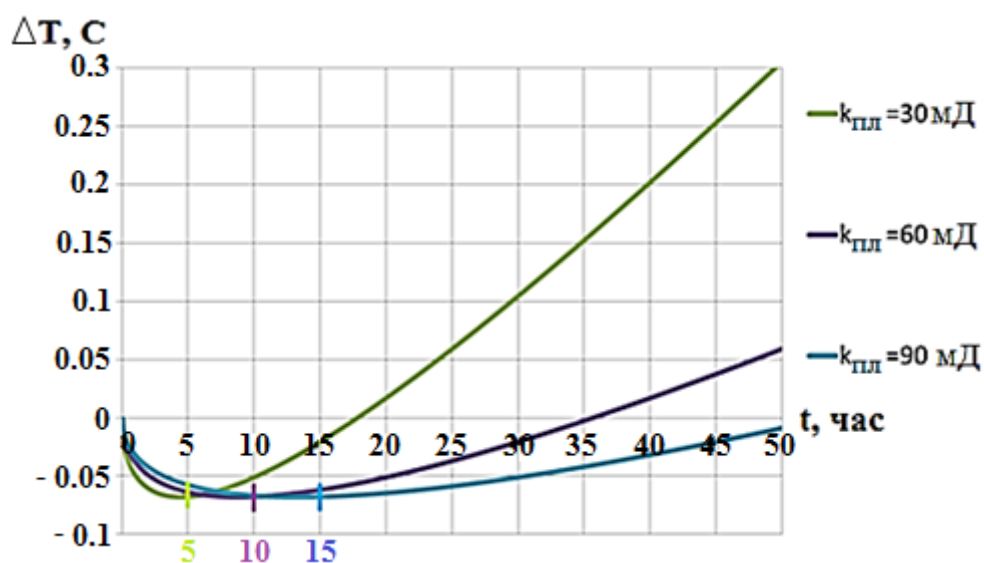


Рис. 5. Изменение температуры при различной проницаемости пласта

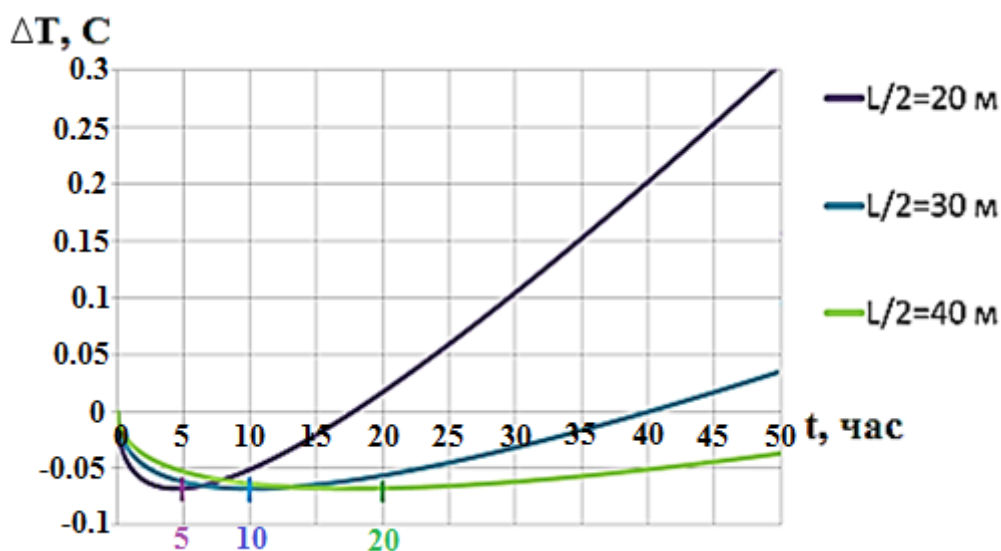
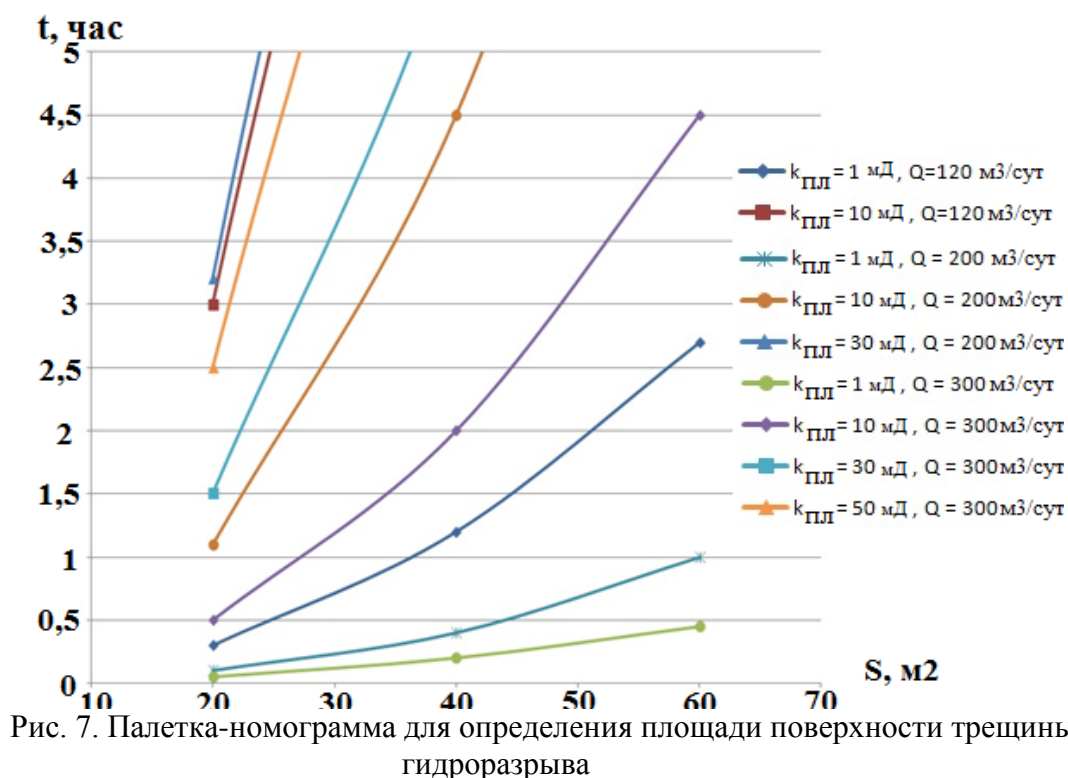


Рис. 6. Изменение температуры при различной полудлине трещины



Третья глава посвящена разработке численной модели тепломассопереноса в системе пласт – трещина ГРП. Численная модель, в отличие от аналитических моделей, учитывает проницаемость трещины, теплопроводность жидкости и породы, термодинамические эффекты в трещине, наличие нарушенной зоны, различные режимы течения жидкости в трещине и пласте, изменение забойного давления со временем и позволяет моделировать различные режимы работы скважины (отбор, закачка и остановка).

Введем следующие допущения:

- однофазный режим течения;
- трещина рассматривается как пористая среда;
- геометрические размеры трещины постоянны;
- 2D геометрия;
- учитывается эффект Джоуля-Томсона, адиабатического расширения, конвективный и кондуктивный механизмы теплопереноса;
- плотности, вязкости жидкостей считаются постоянными;
- фильтрация в пласте и трещине удовлетворяет закону Дарси;
- однотемпературная модель;
- жидкость и порода несжимаемы.

Расположим систему координат как показано на рисунке 8, начало отсчета находится в центре скважины.

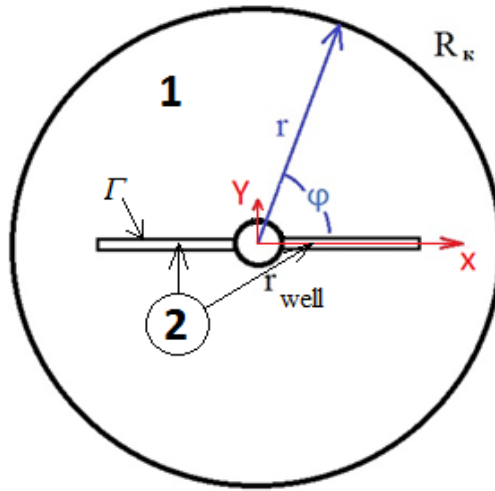


Рис. 8. Геометрия задачи: 1 – область пласта, 2 – область трещины. Система координат для пласта полярная, для трещины Декартова.

Учитывая допущения, уравнение неразрывности для области пласта записывается следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{\rho}{r} \frac{\partial}{\partial r} [r v^r] + \frac{\rho}{r} \frac{\partial}{\partial \varphi} [v^\varphi] &= J(r, \varphi) \\ v^r &= -\frac{k_{res}}{\mu} \frac{\partial p}{\partial r}; \quad v^\varphi = -\frac{1}{r} \frac{k_{res}}{\mu} \frac{\partial p}{\partial \varphi} \end{aligned} \quad (7)$$

где k_{res} – проницаемость пласта, μ – вязкость жидкости, p – давление, r – радиус, φ – угол, $J(r, \varphi)$ – объемная плотность потока массы в единицу времени (характеризует массу жидкости, которая утекает из рассматриваемого элементарного объема пласта в трещину в случае отбора/притекает в случае закачки), ρ – плотность жидкости, v – скорость фильтрации.

Учитывая допущения, уравнение неразрывности для области трещины записывается следующим образом:

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial}{\partial x} [v^x] + \rho \frac{\partial}{\partial y} [v^y] &= 0; \\ v^x &= -\frac{k_{frac}}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x}; \quad v^y = -\frac{k_{frac}}{\mu} \frac{\partial p}{\partial y}; \end{aligned} \quad (8)$$

где k_{frac} – проницаемость трещины, x и y – декартовы координаты.

Граничные и начальные условия для решения уравнений (7) и (8) имеют вид:

$$\begin{aligned} p(r_{well}, \varphi) &= p_{well} \\ p(R_k, \varphi) &= p_{res} \\ p(r, \varphi)|_{t=0} &= p_{res} \\ p(x, y)|_{t=0} &= p_{res} \end{aligned} \quad (9)$$

краевые условия на границе между областью трещины и пласта:

1. равенство потоков: сколько массы жидкости утекает в трещину, столько же утекает из пласта

$$\begin{cases} J(r, \varphi) \cdot r \cdot dr \cdot d\varphi = \rho \cdot v^{l.frac} \cdot dl, (r, \varphi) \in \Gamma \\ J(r, \varphi) = 0, (r, \varphi) \in \text{области } 1 \end{cases} \quad (10)$$

2. равенство давления на границе между областью трещины и пласта

$$p(x, y)|_{\Gamma} = p(r, \varphi)|_{\Gamma}$$

где Γ – граница между областью трещины и пласта (рис. 8), $v^{l.frac}$ – скорость фильтрации жидкости через боковую поверхность трещины, p_{well} – забойное давление, p_{res} – пластовое давление, dl – длина элемента границы области трещины, r_{well} – радиус скважины, R_k – радиус контура.

Учитывая допущения, уравнение энергии для области пласта записывается следующим образом:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \left[m_{res} \cdot \rho \cdot c \cdot T + \left[-m_{res} \cdot \rho_{rock} c_{rock} T \right] \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\rho \cdot c \cdot v^r \cdot T \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left[\rho \cdot c \cdot v^\varphi \cdot T \right] = \\ & = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial \varphi} \right) + m_{res} \cdot \rho \cdot c \cdot \eta \cdot \frac{\partial P}{\partial t} - \rho \cdot c \cdot v^r \cdot \varepsilon \cdot \frac{\partial P}{\partial r} - \rho \cdot c \cdot v^\varphi \cdot \varepsilon \cdot \frac{\partial P}{r \cdot \partial \varphi} + Q(r, \varphi) \end{aligned} \quad (11)$$

где c – теплоемкость жидкости, ρ_{rock} – плотность горной породы, c_{rock} – теплоемкость горной породы, λ – теплопроводность пласта, η – коэффициент адиабатического расширения жидкости, ε – коэффициент Джоуля-Томсона жидкости, T – температура, $Q(r, \varphi)$ – объемная плотность потока тепла в единицу времени (характеризует энергию, которая утекает из пласта в трещину в случае отбора, либо притекает в случае закачки), m_{res} – пористость пласта.

Учитывая допущения, уравнение энергии для области трещины записывается следующим образом:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \left[m_{frac} \cdot \rho \cdot c \cdot T + \left[-m_{frac} \cdot \rho_{rock} c_{rock} T \right] \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[\rho \cdot c \cdot v^x \cdot T \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\rho \cdot c \cdot v^y \cdot T \right] = \\ & = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + m_{frac} \cdot \rho \cdot c \cdot \eta \cdot \frac{\partial P}{\partial t} - \rho \cdot c \cdot v^x \cdot \varepsilon \cdot \frac{\partial P}{\partial x} - \rho \cdot c \cdot v^y \cdot \varepsilon \cdot \frac{\partial P}{\partial y} \end{aligned} \quad (12)$$

где m_{frac} – пористость трещины.

Граничные и начальные условия для решения уравнений (11) и (12) имеют вид:

$$\begin{aligned} T(r, \varphi)|_{t=0} &= T^0 \\ T(x, y)|_{t=0} &= T^0 \\ \text{отбор } T(R_k, \varphi) &= T_0 \\ \text{закачка } T(r_{well}, \varphi) &= T_0 \end{aligned} \quad (13)$$

краевые условия на границе между областью трещины и пласта:

1. равенство потоков: сколько энергии утекает в трещину, столько же утекает из пласта

$$\begin{cases} Q(r, \varphi) \cdot r \cdot dr \cdot d\varphi = \rho \cdot v^{l.frac} \cdot c \cdot T^{in/out} \cdot dl - \lambda \cdot \left[\frac{\partial T}{\partial n} \right] \cdot dl, (r, \varphi) \in \Gamma \\ Q(r, \varphi) = 0, (r, \varphi) \in \text{области 1} \end{cases} \quad (14)$$

2. равенство температуры на границе между областью трещины и пласта

$$T(x, y)|_{\Gamma} = T(r, \varphi)|_{\Gamma}$$

где $T^{in/out}$ - температура жидкости которая притекает из трещины в пласт/утекает из пласта в трещину, n – нормаль к границе области трещины, T^0 - начальная температура пласта и трещины, T_0 - температура на границе (в случае отбора на контуре пласта, в случае закачки на границе со скважиной).

Для того чтобы описать радиальные потоки в пласте и линейные потоки в трещины было решено использовать 2 сетки: сетка с полярной системой координат (r, φ) – для модели пласта и сетка с декартовой системой координат (x, y) – для модели трещины (Рис. 9). Трещина, имеет форму прямоугольника, представляет собой часть (x, y) сетки, ячейки трещины отличаются от ячеек пласта проницаемостью и пористостью. Такой подход делает модель трещины независимой от модели пласта, что позволяет отдельно записать уравнения для этих моделей и независимо протестировать их. Также сетка для трещины является более детальной, чтобы иметь возможность задавать ширину трещины порядка 1 мм. Описание трещины моделью пористой среды является физически допустимым, т.к. трещина в процессе ГРП закрепляется проппантом, который в последствии сжимается под действием горного давления.

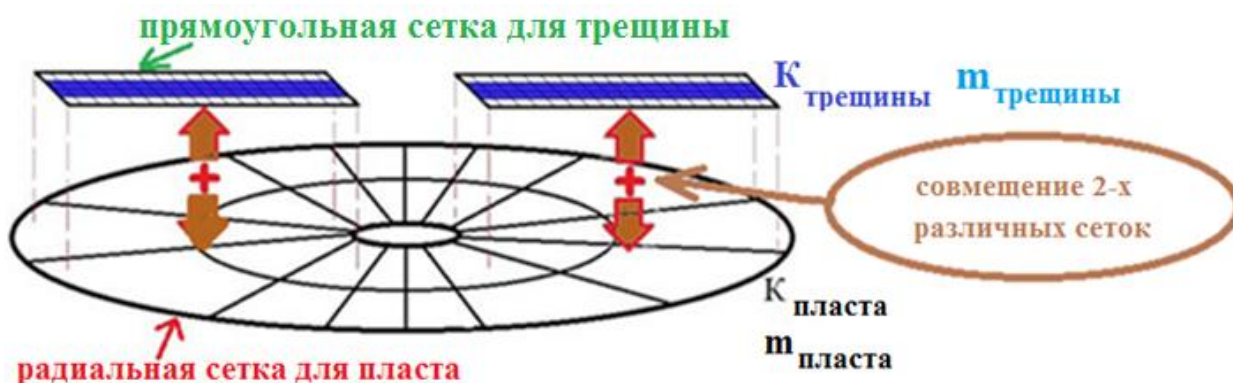


Рис. 9. Сеточная геометрия

Вышеописанные уравнения неразрывности и энергии для пласта и трещины решаются численно с помощью метода контрольного объема. Было проведено тестирование полученных численных решений путем сравнения с известными аналитическими решениями, с коммерческим симулятором COMSOL Multyphysics, также был проведен анализ сеточной сходимости.

Четвертая глава посвящена численному моделированию полей давления и температуры в системе пласт – трещина ГРП на основе разработанной модели. Был проведен анализ чувствительности изменения температуры в скважине к изменению длины, ширины и проницаемости трещины.

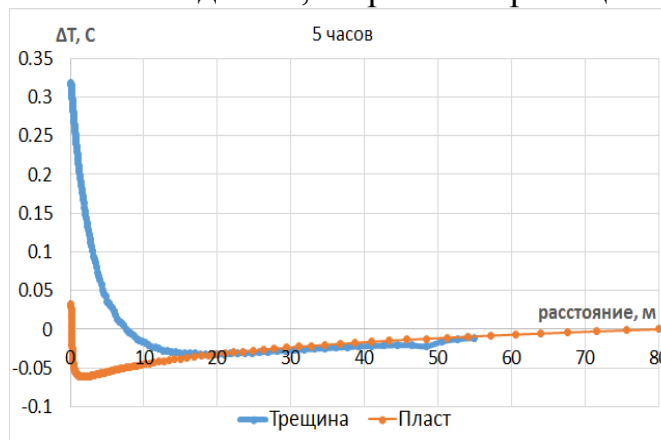


Рис. 10. Изменение температуры в пласте и трещине после 5 часов работы скважины

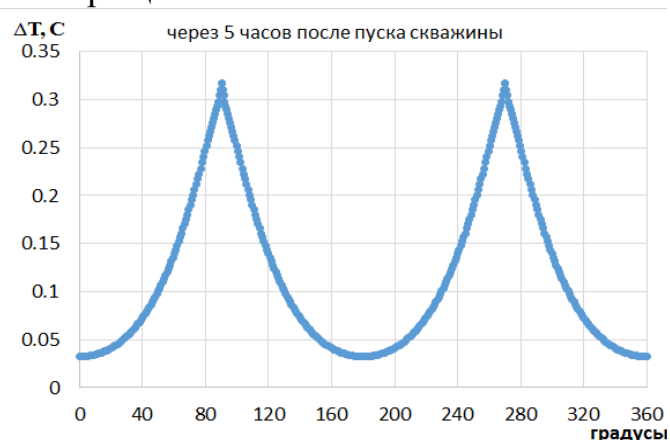


Рис. 11. Распределение температуры вокруг стенки скважины через 5 часов после пуска скважины

На рисунке 10 показан график распределения температуры в пласте (в сечении перпендикулярном трещине) и в трещине после 5 часов отбора нефти. Из графика видно, что темпы изменения температуры в пласте и трещине различаются. В данном примере через 5 часов после начала отбора температура жидкости на выходе из трещины превосходит температуру жидкости на выходе из пласта на 0.3 С. Это связано с тем, что жидкость по трещине приходит из более удаленных зон и соответственно проходит большую депрессию. Таким образом, если построить распределение температуры вокруг стенки скважины, то распределение температуры будет неравномерным и будут наблюдаться 2 пика связанные с положением 2 крыльев трещины (рис. 11), данный эффект можно использовать для определения азимутального направления трещины с помощью азимутально распределенных датчиков температуры.

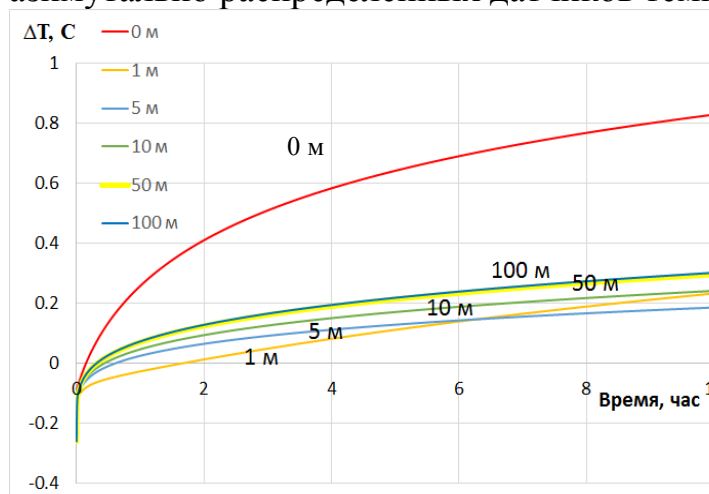


Рис. 12. Изменение температуры в скважине с течением времени после начала отбора при различной полудлине трещины, депрессия 100 атм. Шифр кривых - полудлина трещины.

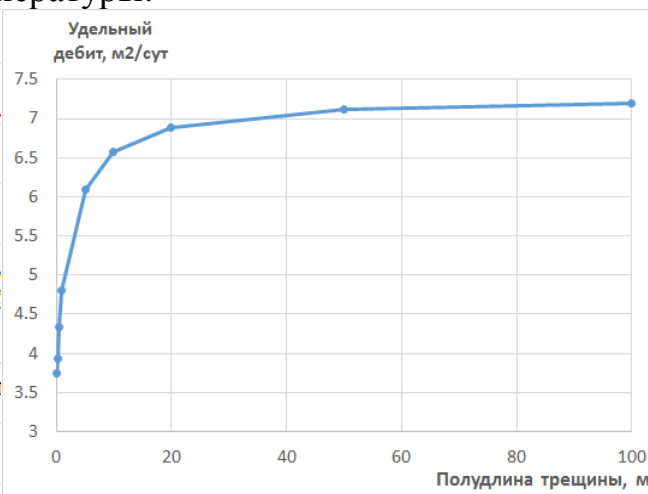


Рис. 13. Зависимость удельного дебита (на единицу высоты) от полудлины трещины.

Практический интерес представляет изучение возможности использования термометрии для определения длины трещины ГРП. На рисунке 12 показан результат расчета изменения температуры в скважине при различной полудлине трещины. Из графика видно, что температура в скважине при увеличении длины трещины изменяется немонотонно. При увеличении длины трещины от 0 до 1 м температура уменьшается, это связано с увеличением доли линейного режима течения в пласте. При дальнейшем увеличении до 100 м, температура немного увеличивается, это связано с увеличением градиента давления в трещине за счет увеличения дебита (рис. 13) и бокового притока, поэтому сильнее проявляется разогрев за счет эффекта Джоуля-Томсона. При увеличении длины трещины снижается чувствительность температуры к изменению длины трещины. Для выбранных параметров расчета, изменение температуры при полудлине трещины 50 м и 100 м практически совпадает. Это можно объяснить уменьшением прироста дебита с увеличением длины трещины (рис. 13).

В практике гидроразрыва пласта также одним из варьируемых параметров является ширина трещины. Это связано с тем, что для достижения максимума продуктивности в низкопроницаемых породах необходимо создавать узкие и длинные трещины, а в высокопроницаемых – широкие, но короткие². Для этого применяется специальная технология TSO (технология концевое экранирования). Поэтому является актуальным оценить чувствительность изменения температуры к ширине трещины.

На рис. 14 показана зависимость изменения температуры в скважине после 10 часов отбора от ширины трещины. Из графика видно, что при увеличении ширины трещины изменение температуры уменьшается. Это связано с уменьшением градиента давления в трещине при увеличении ширины трещины, не смотря на увеличение удельного дебита (на единицу высоты, рис. 14).

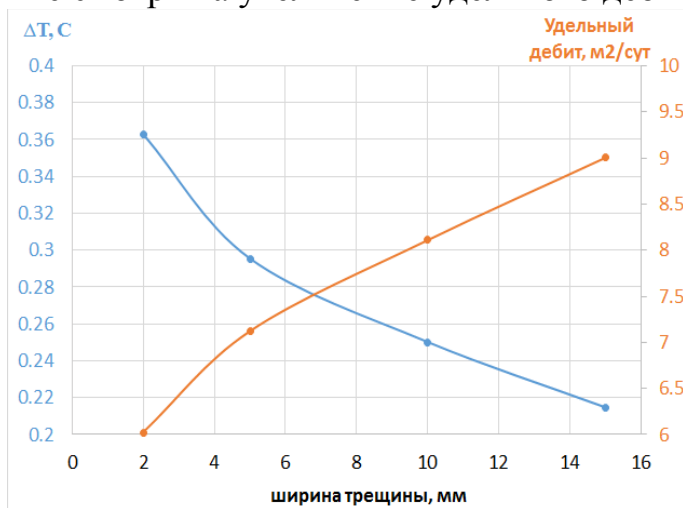


Рис. 14. Зависимость изменения температуры в скважине после 10 часов отбора и удельного

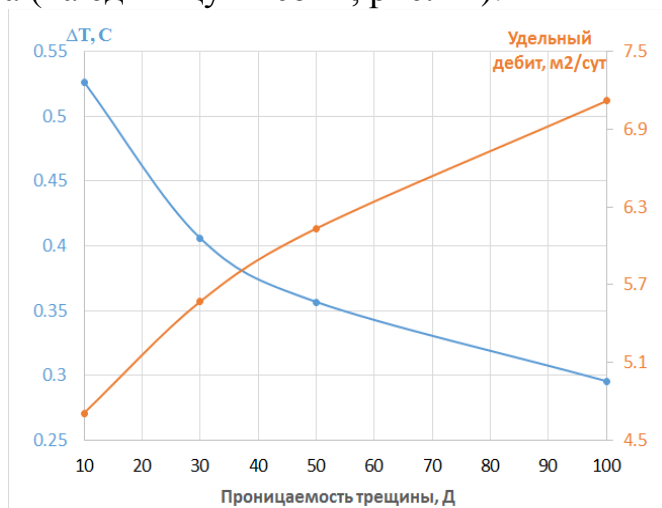


Рис. 15. Зависимость изменения температуры в скважине после 10 часов отбора и удельного

дебита от ширины трещины. Синяя кривая – изменение температуры, коричневая – изменение удельного дебита. Депрессия 100 атм. Зависимость изменения температуры в скважине после 10 часов отбора и удельного дебита от проницаемости трещины. Синяя кривая – изменение температуры, коричневая – изменение удельного дебита. Депрессия 100 атм.

² Michael Economides, Ronald Oligney, Peter Valkó. Unified fracture design: bridging the gap between theory and practice. Texas: Orsa Press, 2002.

При гидроразрыве пласта используются различные виды проппантов, которые отличаются, во-первых, своим составом - кварцевые пески и синтетические проппанты, во-вторых, своим размером - наиболее часто применяют проппанты с размерами 0.425-0.85 мм (20/40 меш), реже 0.85- 1.7 мм (12/20 меш), 0.85-1.18 мм (16/20 меш), 0.212-0.425 мм (40/70 меш). Чем крупнее гранулы, тем большей проницаемостью обладает упаковка проппанта в трещине. Также проницаемость трещины зависит от концентрации полимера (который применяется в качестве загустителя при изготовлении жидкости разрыва), вследствие его обезвоживания в трещине, что значительно снижает остаточную проницаемость упаковки проппанта. Так, проницаемость упаковки проппанта, составляющая 100 Д, снижается приблизительно до 30 Д, если концентрация полимера достигнет 200 фунтов на 1000 галлонов в конце операций по гидравлическому разрыву. Концентрированный полимер нелегко вытеснить из упаковки проппанта потоком нефти или газа. Поэтому является актуальным оценить чувствительность изменения температуры к проницаемости трещины.

На рис. 15 показана зависимость изменения температуры в скважине после 10 часов отбора при различной проницаемости трещины. Из графика видно, что при увеличении проницаемости трещины изменение температуры уменьшается. Это связано с уменьшением градиента давления в трещине при увеличении проницаемости трещины, не смотря на увеличение дебита (рис. 15).

Актуальным является изучение влияния неоднородности призабойной зоны в пласте с трещиной гидроразрыва на температурное поле. Нарушение призабойной зоны может быть обусловлено несколькими причинами: проникновением фильтрата бурового раствора в процессе бурения; отложение асфальтенов, смол и парафинов и т.д.

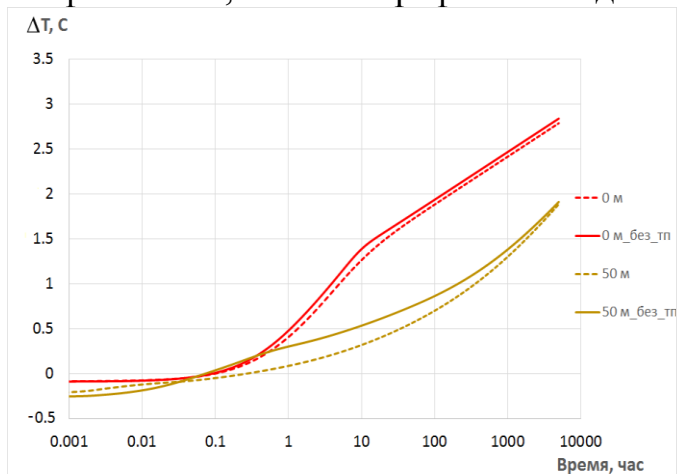


Рис. 16. Сравнение изменения температуры при наличии и отсутствии трещины. Пунктирные кривые соответствуют расчетам с учетом теплопроводности пласта, сплошные – без учета теплопроводности. Депрессия 100 атм.

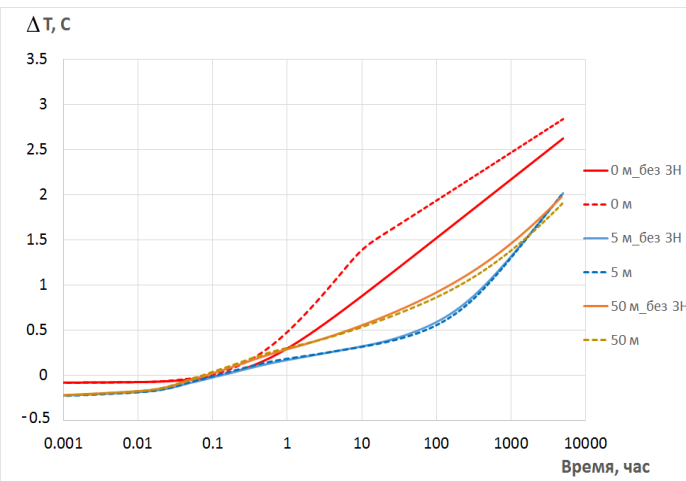


Рис. 17. Изменение температуры при различной полудлине трещины. Пунктирные кривые соответствуют случаю с наличием зоны нарушения, сплошные – при отсутствии зоны нарушения. Депрессия 100 атм.

На рис. 16 приведены расчеты изменения температуры в скважине при учете и без учета теплопроводности, при полудлине трещины 0 и 50 м, радиус нарушенной зоны 0.5 м, проницаемость нарушенной зоны в 2 раза меньше

проницаемости пласта. Из графика видно, что при отсутствии трещины и без учета теплопроводности наблюдается «заметный» излом на кривой изменения температуры, связанный с наличием зоны нарушения³. Из-за влияния теплопроводности изломы на кривых температуры сглаживаются. Этот эффект усиливается при небольшой скорости фильтрации в низкопроницаемом пласте, т.е. вклад кондуктивной составляющей увеличивается и кривые сильнее сглаживаются. Чтобы понять причины изменения наклона кривой температуры при длине трещины 50 м, был проведен расчет при наличии и отсутствии зоны нарушения, при различной длине трещины, без учета теплопроводности, чтобы исключить сглаживание кривых (рис. 17). Из графика видно, что наличие изломов кривых температуры при наличии трещины связано не с влиянием зоны нарушения, а с влиянием самой трещины. Наклон кривых при наличии трещины изменяется из-за того, что при малых временах после пуска скважины в работу на изменение температуры влияет линейным режим фильтрации около трещины. С течением времени, когда жидкость начинает приходить из удаленных от трещины областей, усиливается влияние радиального режима фильтрации. Таким образом, наличие трещины затрудняет диагностику нарушенной зоны по данным термометрии, а низкая проницаемость пласта приводит к увеличению влияния кондуктивного механизма теплопереноса, что также осложняет диагностику.

Анализ восстановления температуры в скважине позволяет определять интервалы, где меняются условия теплообмена, и, на основании этого, определять места заколонных циркуляций, негерметичностей обсадной колонны и НКТ и др. Поэтому является актуальным изучить влияние трещины ГРП на восстановление температуры в скважине после остановки закачки. Был смоделирован процесс закачки воды в пласт при наличии трещины с последующей остановкой: удельная приемистость 15.2 м²/сут, время закачки 2 часа, температура закачиваемой воды 40 С, начальная температура пласта 50 С.

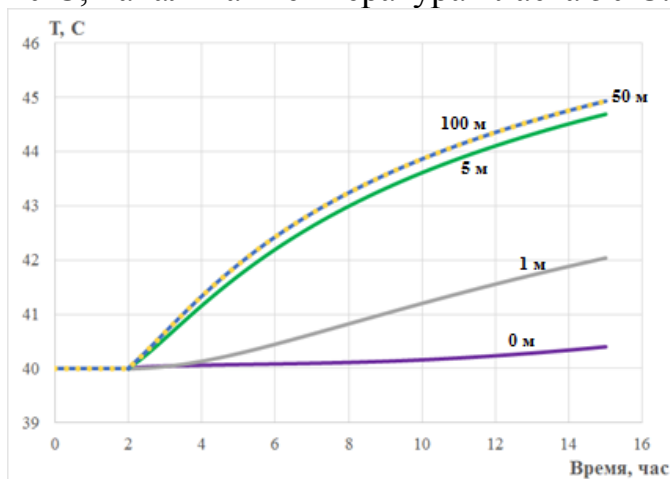


Рис. 18. Изменение температуры в скважине в процессе закачки и после остановки при различной полудлине трещины. Шифр кривых соответствует полудлине трещины.

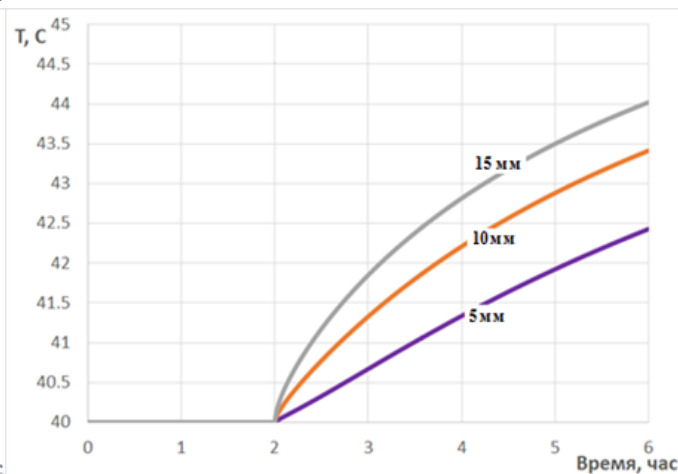


Рис. 19. Изменение температуры в скважине в процессе закачки и после остановки при различной ширине трещины, полудлина трещины 50 м. Шифр кривых соответствует ширине трещины.

³ Исламов Д.Ф., Рамазанов А.Ш. Нестационарное температурное поле при фильтрации жидкости в неоднородном пласте // Вестник Башкирского университета. 2016. №1. С. 4 – 8.

На рис. 18 представлен результат расчета изменения температуры в скважине напротив пласта с трещиной ГРП при различной полудлине трещины. Из графика видно, что темп восстановления температуры увеличивается при увеличении длины трещины. В данном случае, приемистость считается постоянной, поэтому один и тот же объем закаченной жидкости при увеличении длины трещины уходит по трещине на большее расстояние от скважины (рис. 20). Непосредственное влияние на восстановление температуры в скважине оказывает область теплового возмущения от нагнетаемой жидкости в призабойной зоне, при увеличении длины трещины область теплового возмущения в призабойной зоне уменьшается (больше холодной жидкости уходит по узкой трещине гидроразрыва в глубь пласта) и поэтому увеличивается темп восстановления температуры.

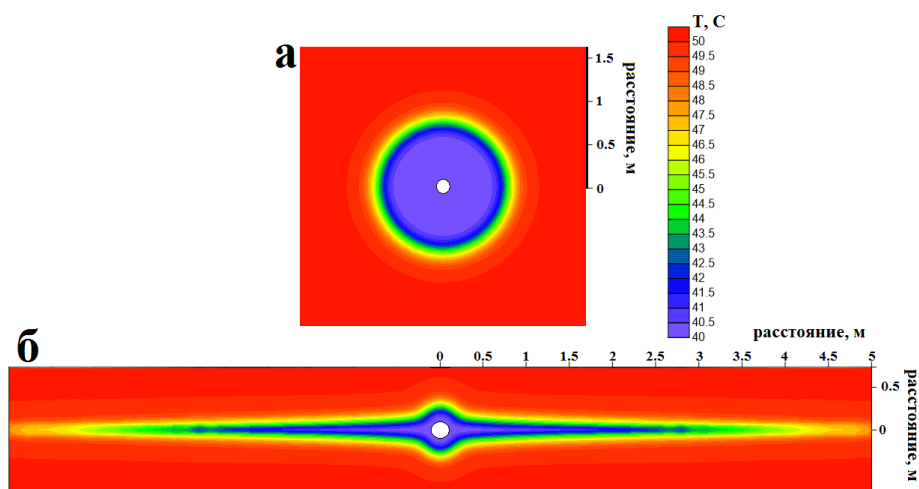


Рис. 20. Распределение температуры в пласте без ГРП (а) и с трещиной ГРП (б) после 2 часов закачки, ширина трещины 5 мм, удельная приемистость 15.2 м²/сут, а - полудлина трещины 0 м, б - полудлина трещины 100 м.

На рис. 19 показан результат расчета восстановления температуры в скважине при различной ширине трещины. Из графика видно, что чем больше ширина трещины, тем больше темп восстановления температуры. Потому что, чем больше ширина трещины, тем дальше вглубь пласта уходит закачиваемая холодная жидкость по трещине и область теплового возмущения в призабойной зоне уменьшается.

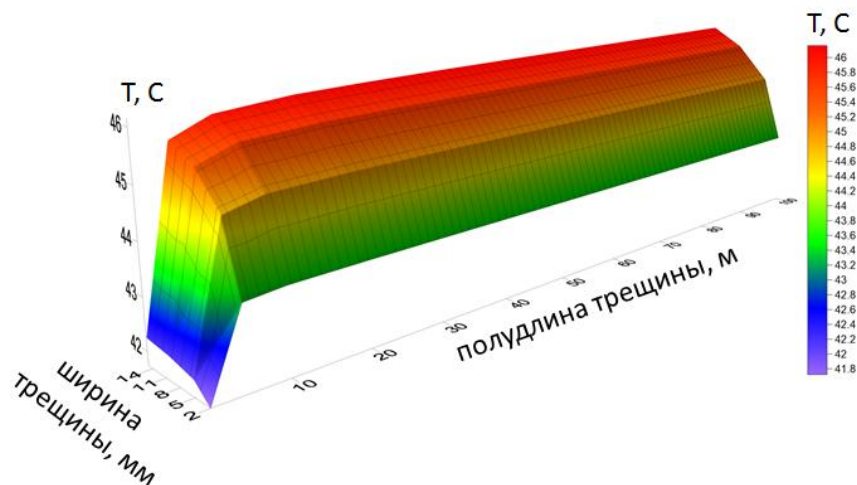


Рис. 21. Значение температуры через 13 часов после остановки закачки в зависимости от полудлины и ширины трещины. Закачка с приемистостью 15.2 м²/сут, время закачки 2 часа.

На рис. 21 изображена поверхность, которая отражает совместное влияние длины и ширины трещины на восстановление температуры. Видно, что при полудлине больше 10 метров, изменение длины трещины практически перестает влиять на восстановление температуры в скважине, в отличие от ширины трещины. Причем разность температуры между шириной трещины, например, 2 мм и 5 мм составляет порядка 1 С, что возможно зарегистрировать существующей аппаратурой. Поэтому, анализ восстановления температуры в скважине в интервале пласта с трещиной ГРП позволяет оценить ширину трещины.

Пятая глава посвящена рассмотрению путей практического использования полученных результатов исследований термогидродинамических процессов в системе пласт-трещина ГРП. Рассмотрены методики определения параметров трещины по данным термометрии:

- определение площади поверхности трещины на основе палеток-номограмм, полученных на основе аналитических моделей
- определение параметров трещины с помощью решения обратной задачи на основе численной модели
- определение азимутального направления трещины гидроразрыва по измерению температуры в скважине с помощью распределенных по азимуту датчиков температуры.

Представлен пример решения обратной задачи по определению ширины трещины для скважины Рускинского месторождения на основе данных восстановления температуры после ГРП (рис. 22).

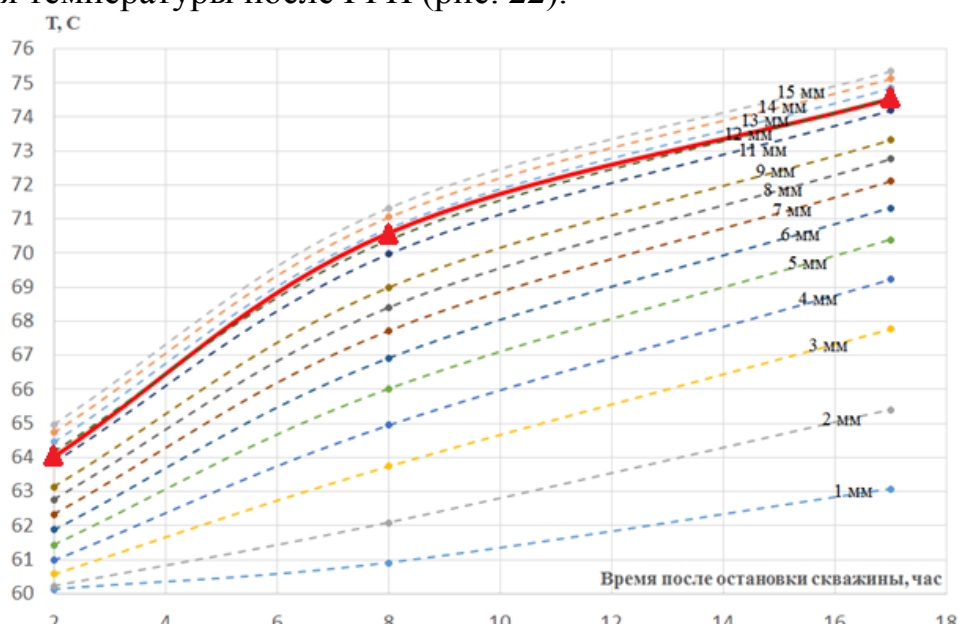


Рис. 22. Восстановление температуры в скважине после остановки закачки.
Шифр кривых соответствует ширине трещины

Измерения восстановления температуры проводились в скважине в интервале перфорации через 2, 8 и 17 часов после прекращения закачки флюида. Полевые данные изменения температуры на рис. 22 представлены сплошной линией, а пунктирные линии соответствуют многовариантным расчетам при варьировании ширины трещины. Представленное на графике сравнение показывает, что ширина полученной трещины равняется 12 мм.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Проведен анализ чувствительности температуры к изменению длины трещины, проницаемости пласта и дебита на основе аналитических моделей для линейного и радиального режимов течения жидкости в пласте при условии постоянного дебита. Показано, что темп роста температуры в случае радиального режима течения больше по сравнению с линейным режимом течения из-за большего значения градиента давления около скважины, в следствие чего сильнее проявляется эффект Джоуля-Томсона.
2. Установлено, что признаком линейного режима течения в пласте является линейная зависимость производной температуры, а радиального - постоянное значение производной на диагностическом графике.
3. Разработана аналитическая модель для расчета изменения температуры в трещине, которая учитывает калориметрическое смешивание жидкости в трещине с жидкостью, поступающей из пласта. Разница между температурой притекающей из пласта жидкости и температурой трещины связана с эффектом температурного влияния трещины и обусловлена теплоемкостью трещины.
4. Разработана и протестирована численная модель тепломассопереноса жидкости в системе пласт – трещина ГРП с учетом термодинамических эффектов. Предложен метод расчета на двух независимых сетках: радиальная сетка для пласта и прямоугольная сетка для трещины. На основе численной модели создан симулятор для расчета полей давления и температуры.
5. На основании численного эксперимента проведен анализ параметрической чувствительности температуры к изменению длины и ширины трещины, проницаемости трещины и пласта при различных режимах работы скважины: отбор, закачка и остановка.
6. Установлено, что из-за проявления эффекта Джоуля-Томсона темп роста температуры в трещине больше, чем в пласте. Поэтому анализ азимутального распределения температуры в скважине напротив пласта с трещиной ГРП позволяет определить азимутальное направление трещины.
7. Изучено влияние нарушенной зоны на изменение температуры в скважине. Показано, что наличие трещины экранирует влияние нарушенной зоны.
8. Изучено влияние трещины ГРП на восстановление температуры в скважине после остановки закачки. Установлено, что наличие трещины в пласте приводит к увеличению темпов восстановления температуры. Анализ восстановления температуры в скважине в интервале пласта с трещиной ГРП позволяет оценить ширину трещины.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

Публикации в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК РФ:

1. Рамазанов А.Ш., Шарипов А.М., Нагимов В.М. Аналитические модели для диагностики гидроразрыва пласта по данным термогидродинамических исследований // НТВ “Каротажник”. Тверь: Изд. АИС. 2014. Вып. №9 (243). С. 77-82.
2. Рамазанов А.Ш., Шарипов А.М. Оценка влияния теплоемкости трещины при измерении нестационарной температуры в скважине с ГРП // НТВ “Каротажник”. Тверь: Изд. АИС. 2016. Вып. №5 (263). С. 81-87.
3. Шарипов А.М., Шарафутдинов Р.Ф., Рамазанов А.Ш., Валиуллин Р.А. Исследование влияния неоднородности в пласте с трещиной гидроразрыва на температурное поле // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2017. №4. С. 32-35.
4. Шарипов А.М., Шарафутдинов Р.Ф., Рамазанов А.Ш., Валиуллин Р.А. Исследование восстановления температуры в скважине после прекращения закачки воды в пласт с трещиной ГРП // Вестник Башкирского университета. 2017. Том 22. №2. С. 301 – 306.
5. Шарафутдинов Р.Ф., Бочков А.С., Шарипов А.М., Садретдинов А.А. Фильтрация газированной нефти при наличии фазовых переходов в пористой среде с неоднородной проницаемостью // Прикладная механика и техническая физика. 2017. №2. С. 98-102.
6. Шарафутдинов Р.Ф., Садретдинов А.А., Шарипов А.М. Численное исследование температурного поля в пласте с трещиной гидроразрыва // Прикладная механика и техническая физика. 2017. №4. С. 152-161.

Свидетельство:

7. Свидетельство № 2017613883 Российская Федерация. Симулятор для расчета изменения температуры в пласте с трещиной ГРП: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ / Шарипов А.М., Шарафутдинов Р.Ф., Садретдинов А.А., Валиуллин Р.А.; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО Башкирский государственный университет. - №2016663972; заявл. 20.12.2016.

Публикации в других изданиях:

8. Шарипов А.М. Температурная диагностика режимов течения в скважинах с ГРП // Сборник докладов международного VIII Российско-китайского симпозиума по промысловой геофизике. Пекин, КНР, ноябрь 2014 г. С. 117-120.
9. Sharipov A.M. Analysis of temperature change in fractured wells after start-up // Тезисы докладов международного форума “Black Gold”, Уфа 11-13 мая, 2015 г. С. 63.
10. Шарипов А.М. Моделирование тепло-массо переноса в системе пласт-трещина гидроразрыва // Тезисы докладов международной XXI научно-

- практической конференции «Новая техника и технологии для геофизических исследований скважин». Уфа: Изд-во “НПФ Геофизика” 2015 г. С. 187-190.
11. Шарипов А.М. Температурная диагностика режимов течения в пласте // Материалы всероссийской конференции ВНКСФ-21, Омск 2015 г. С. 438-440.
 12. Sharipov A.M. Numerical modeling of temperature in reservoir with fracturing // Abstracts SPE Black Gold Symposium, 2016. Ufa. p.85.
 13. Шарипов А.М. К вопросу применения термометрии для диагностики состояния трещины ГРП // Тезисы докладов XXII научно-практической конференции «Новая геофизическая техника и технологии для решения задач нефтегазовых и сервисных компаний», Уфа 2016. С. 138-140.
 14. Шарипов А.М. Численное исследование изменения температуры в пласте с трещиной гидроразрыва // тезисы докладов региональной школы-конференции для студентов, аспирантов и молодых ученых «Фундаментальная математика и ее приложения в естествознании», секция геофизики. Уфа: РИЦ БашГУ, 2016. С. 104.
 15. Шарипов А.М. Моделирование термогидродинамических процессов в пласте с трещиной ГРП // Тезисы докладов XXIII международной научно-практической конференции «Новая геофизическая техника и технологии для решения задач нефтегазовых и сервисных компаний», Уфа 2017. С. 88.